

3. БИПОЛЯРНЫЙ ТРАНЗИСТОР

Полупроводниковый триод, или транзистор представляет собой сформированные в единой межкристаллической пластинке три слоя примесного полупроводника, из которых два крайних имеют одинаковый тип проводимости, а средний – проводимость противоположного типа. Соответственно различают транзисторы $p-n-p$ –типа и $n-p-n$ –типа, структура и условное обозначение которых показано на рис.3.1. Средний слой называется базой, а два крайних – эмиттером и коллектором. Они имеют электрические контакты с металлическими выводами, обозначаемыми соответственно Б, Э и К.

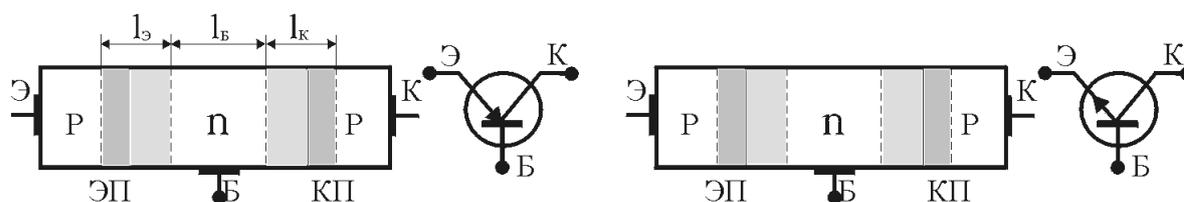


Рис.3. 1

База отделена от эмиттера «эмиттерным $p-n$ -переходом» (ЭП) и от коллектора - «коллекторным $p-n$ -переходом» (КП), которые совместно с базой играют основную роль в транзисторе.

В дальнейшем для определенности будем рассматривать только транзистор $p-n-p$ –типа.

Эмиттер и коллектор транзистора имеют большую концентрацию акцепторных атомов примеси и образующихся при термоактивации этих атомов основных носителей тока – дырок. Поэтому эмиттер и коллектор являются низкоомными слоями транзистора, химический потенциал которых на энергетической зонной диаграмме (Рис.3.3) расположен вблизи акцепторного уровня. База имеет существенно меньшую (в 100- 1000раз) концентрацию донорных атомов примеси и соответственно основных носителей тока – свободных электронов. Она является высокоомным слоем транзистора, и ее химический потенциал смещен от донорского уровня в сторону середины запрещенной зоны.

В каждом слое транзистора вследствие термоактивации собственных электронно–дырочных пар полупроводника содержится некоторое количество неосновных носителей тока: свободных электронов в эмиттере и в коллекторе, дырок – в базе.

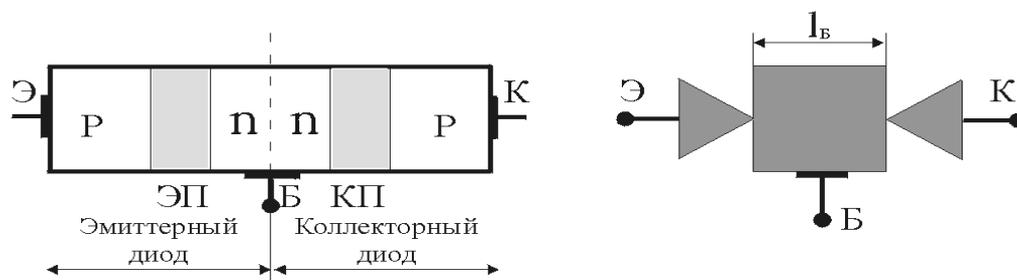


Рис3. 2

При рабочих температурах до 350К в германиевых и до 400 К в кремниевых транзисторах) концентрация основных носителей много больше концентрации неосновных носителей. При более высоких температурах эти концентрации возрастают и выравниваются, различие между слоями исчезает, и транзистор становится неработоспособным. Существенно, разная концентрация примесных атомов в смежных слоях транзистора приводит к формированию между этими слоями несимметричных $p-n$ -переходов.

Для транзистора имеет значение то, что при этом оба $p-n$ -перехода размещаются в основном в высокоомном слое – в базе. Изменение ширины $l_{\text{Э}}$ или $l_{\text{К}}$ $p-n$ -перехода в рабочем состоянии транзистора приводит к изменению ширины $l_{\text{Б}}$ (модуляции базы). Это обстоятельство будет учтено позднее.

Если транзистор мысленно разделить на две части, как бы разрезав базу, то каждая часть, содержащая $p-n$ -переход, может быть представлена как полупроводниковый диод. Оба диода соединены n -слоями, имеющими общий контакт с металлическим выводом. Поэтому транзистор эквивалентен двум встречно соединенным диодам, как показано на рис. 3.2. Важно, однако, помнить, что при описании процессов в базе она должна рассматриваться неразделенной, как единое целое.

Принятое допущение позволяет распространить на транзистор рассмотренный выше процесс образования $p-n$ -переходов, их работу в смещенном состоянии (прямое и обратное включение), энергетическую зонную диаграмму в равновесном и смещенном состояниях, формулу для прямого тока через эмиттерный $p-n$ -переход.

3.1 РАВНОВЕСНАЯ ЗОННАЯ ДИАГРАММА ТРАНЗИСТОРА

Равновесная (при отсутствии внешних напряжений) энергетическая зонная диаграмма транзистора показана на рис.3. 3. Она состоит как бы из двух частей, имеющих относительно условной линии «разреза транзистора» зеркально симметричный вид. Признаком равновесия является одинаковое для всех слоев транзистора значение химического потенциала E_F , лежащего на одной горизонтальной прямой. На рис. 3.3 обозначены: ΔE_3 -ширина запрещенной зоны; ΔE_A и ΔE_D - энергия активации акцепторных и донорных атомов примеси; $l_{\text{Э0}}$ и $l_{\text{К0}}$ равновесные значения ширины ЭП и КП;

$\Delta E_0 = q_e \Delta \phi_0$ – потенциальный барьер ($\Delta \phi_0$ контактная разность потенциалов) на ЭП и КП; q_e – элементарный заряд; $P_{Э0}, P_{К0}, P_{Б0}$ – равновесные концентрации основных носителей Э, К и Б; $n'_{Э0}, n'_{К0}, p'_{Б0}$ соответствующие концентрации неосновных

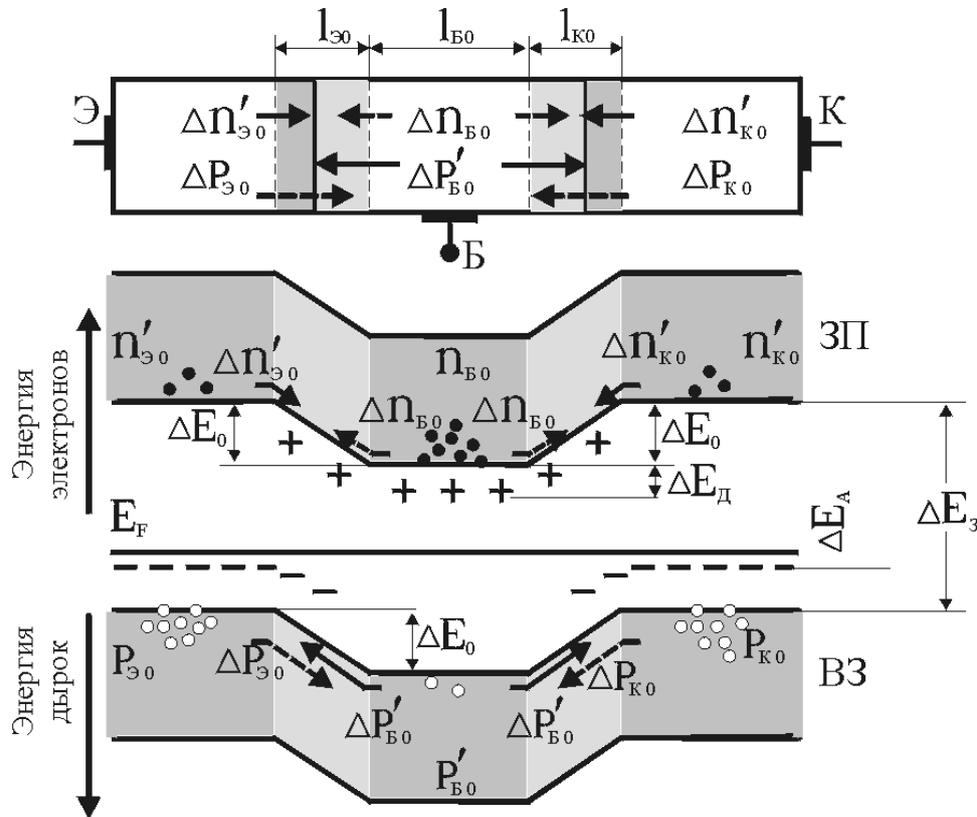


Рис3. 3

носителей. Кроме того на Рис 3.3 обозначены равновесные потоки свободных носителей заряда:

через ЭП: $\Delta P_{Э0}$ и $\Delta n_{Б0}$ диффузионные потоки дырок и электронов; $n'_{Э0}, p'_{Б0}$ – дрейфовые потоки электронов и дырок соответственно из эмиттера и из базы;

через КП: $\Delta P_{К0}$ и $\Delta n_{Б0}$ диффузионные потоки дырок и электронов, $\Delta n'_{К0}, \Delta p'_{Э0}$ – дрейфовые потоки электронов и дырок соответственно из коллектора и из базы.

при равновесии $\Delta P_{Э0} = \Delta P'_{Б0}, \Delta n_{Б0} = \Delta n'_{Э0}, \Delta n_{Б0} = \Delta n'_{К0}, \Delta P_{К0} = \Delta P'_{Б0}$, причем $\Delta P_{Э0} \gg \Delta n_{Б0}$ и $\Delta P_{К0} \gg \Delta n_{К0}$.

Отметим, что дрейфовые потоки, являясь потоками неосновных носителей, концентрация которых определяется термогенерацией собственных электронно-дырочных пар полупроводника, от высоты потенциального барьера ΔE_0 не зависит, но находятся в сильной зависимости от температуры транзистора. Наоборот, диффузионные потоки основных носителей зависят от высоты преодолеваемого ими потенциального барьера на $p-n$ переходах.

3.1 РАБОТА ТРАНЗИСТОРА

В транзисторах, применяемых в схемах усилителей, эмиттерный $p - n$ -переход всегда «смещен в прямом направлении», а коллекторный $p - n$ -переход «смещен в обратном направлении». Это означает, что в $p - n - p$ -транзисторах **по отношению к базе** на эмиттере всегда «+» сравнительно малого внешнего напряжения («прямое» напряжение U), а на коллекторе всегда «-» весьма большего по значению внешнего напряжения («обратное» напряжение U'), как показано на рис.3.4. Напряжение U и U' постоянные и получили название «напряжение смещения». В соответствии с изложенным в части 2, на эмиттерном переходе при этом понижается разность потенциалов $\Delta\varphi_э = \Delta\varphi_о - U$, уменьшаются ширина перехода $l_э = l_{э0}\sqrt{\Delta\varphi_э/\Delta\varphi_о}$ и потенциальный барьер $\Delta E_э = \Delta E_о - q_о U$, а химический потенциал $\Delta E_{Fэ}$, смещается, уменьшается на $\Delta E_{Fэ} = q_о U$ по отношению к его значению E_{FB} для базы. Сопротивление $r_э$ эмиттерного перехода уменьшается, и он становится сравнительно низкоомным.

Наоборот, на коллекторном переходе значительно повышается разность потенциалов $\Delta\varphi_к = \Delta\varphi_о + U'$, увеличивается ширина перехода $l_к = l_{к0}\sqrt{\Delta\varphi_к/\Delta\varphi_о}$ и потенциальный барьер $\Delta E_к = \Delta E_о + q_о U'$, уровень Ферми $\Delta E_{Fк}$ относительно ΔE_{FB} смещается, увеличиваясь на $\Delta E_{Fк} = q_о U'$. Сопротивление $r_к$ коллекторного перехода существенно возрастает, он становится высокоомным: $r_к \gg r_э$.

Таким образом, в рабочем состоянии транзистор сочетает в себе низкоомный ЭП и высокоомный КП, разделенные базой. Это обстоятельство и отражено в самом названии «транзистор». Отметим, что сопротивление эмиттера и коллектора пренебрежимо мало (порядка 1 Ом). Поэтому можно считать, что подводимые к металлическим выводам транзистора напряжения приложены непосредственно к ЭП или КП.

Энергетическая зонная диаграмма транзистора в рабочем состоянии показана на Рис.3.4. Она сочетает в себе две диаграммы для диодов при прямом (левая часть) и при обратном (правая часть) их включении.

В рабочем состоянии транзистора его эмиттер служит для инжекции (нагнетания) через низкоомный ЭП в базу неосновных для нее носителей дырок. Инжекция происходит вследствие понижения барьера $\Delta E_э$ для дырок эмиттера $P_э$. При этом в базе у границы ЭП появляются избыточные дырки, концентрация которых на $P_{эБ}$ больше равновесной.

В базе происходит процесс переноса избыточных дырок от ЭП к КП, сопровождающийся частичной их рекомбинацией при встрече со свободными электронами базы. Процесс переноса дырок в базе имеет диффузионный характер. Поэтому здесь важную роль играет «диффузионная длина» $L_{РБ}$ для дырок в базе, определяемая как расстояние, на котором концентрация дырок, инжектированных в базу, уменьшатся по мере удаления

от ЭП за счет рекомбинации в e раз, т.е. $\Delta P_1 = \Delta P_{ЭК} / e$, как показано на рис.3.5.

Порядок величины $L_{PB} \approx 1$ мм. Чем уже база, тем меньше вероятность встречи дырок со свободными электронами и их рекомбинации, когда они перестают существовать как свободные носители заряда. Обычно ширину базы делают, исходя из условия $l_{PB} \leq (0,1-0,2) L_{PB}$. В этом случае количество рекомбинировавших дырок ΔP_B мало, и из общего числа инжектированных дырок до коллекторного перехода доходит подавляющая их часть.

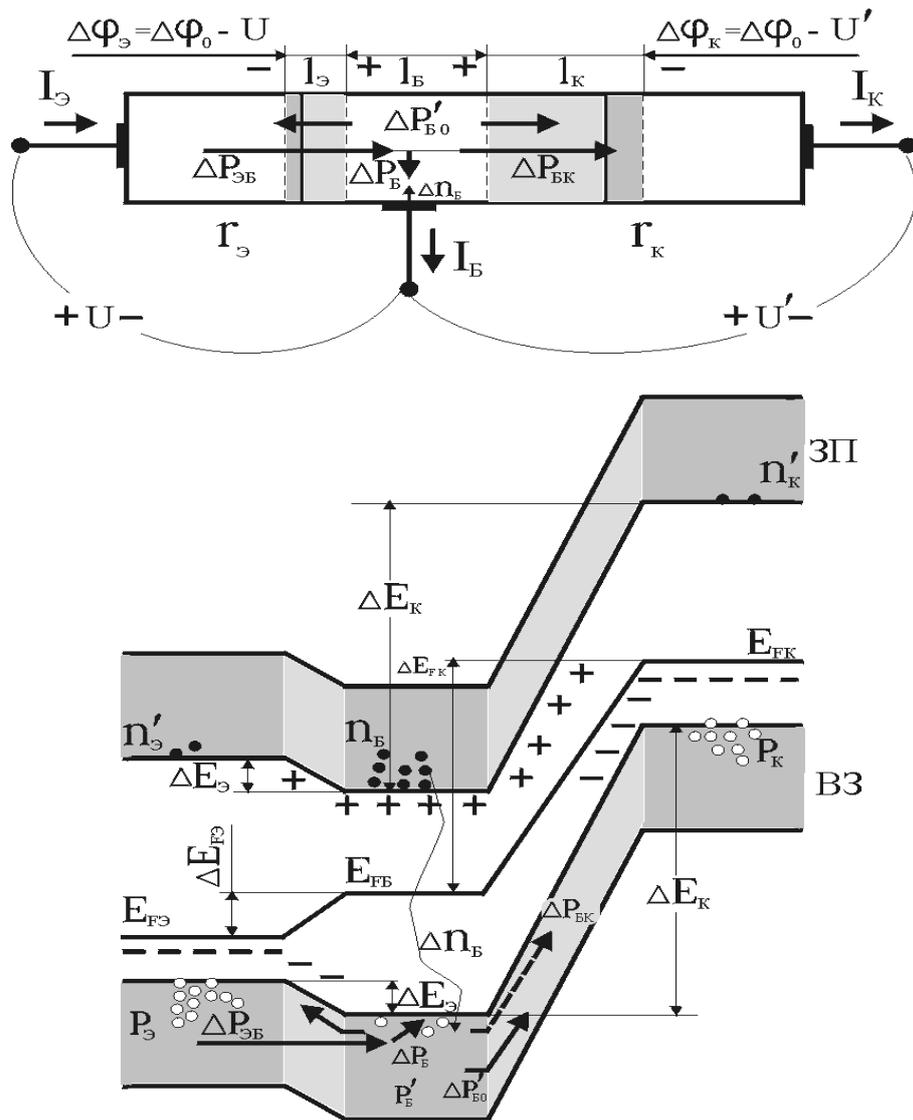


Рис.3. 4

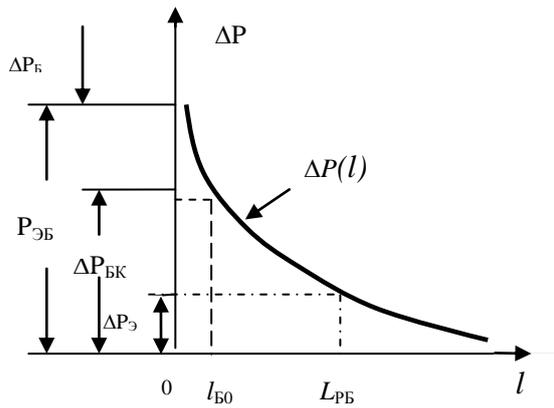


Рис.3.5

$$\Delta P_{BR} = \alpha \Delta P_{ЭБ}, \quad (3.1)$$

Где α - коэффициент переноса неосновных носителей (дырок) через базу. В современных транзисторах получают $\alpha = 0,95 - 0,99$ и больше (но всегда $\alpha < 1$). В лучших современных транзисторах получают ширину базы не более $10^{-4} - 10^{-5}$ мм.

Коллектор в транзисторах осуществляет процесс экстракции (отсоса) избыточных дырок ΔP_{BR} , появившихся у границы коллекторного перехода. Для этих дырок коллектор является глубокой потенциальной ямой ($\Delta E_K \gg \Delta E_O$), куда они, свободно проходя через высокоомный КП, «скатываются», пополняя концентрацию основных носителей тока коллектора.

3.1.1 Рабочие токи транзистора

На рис.3. 4 для $p - n - p$ - транзистора показаны дырочные потоки инжекции $\Delta P_{ЭБ}$ рекомбинации $\Delta P_{Б}$ и экстракции $\Delta P_{БК}$. На энергетической зонной диаграмме все они «протекают» в валентной зоне транзистора. Эти потоки создают дырочный ток эмиттера $I_{Э}$ и коллектора $I_{К}$, а также электронный ток базы $I_{Б}$, поскольку в базу из внешней цепи устремляется поток электронов $\Delta n_{Б}$ (ток течет из базы), компенсирующих убыль свободных электронов базы.

Эмиттерный ток, по существу, является прямым током полупроводникового диода с несимметричным $p - n$ -переходом и определяется формулой:

$$I_{Э} = I_{Э0} \left(e^{\frac{q_e U}{kT}} - 1 \right), \quad (3.2)$$

Где $I_{Э0} = q_e D_{РБ} S P'_{Б0} L_{РБ}^{-1}$ тепловой дырочный ток эмиттера, определяемый потоком $\Delta P'_{Б0}$ через ЭП; $q = 1.6 \cdot 10^{-19}$ Кл – элементарный заряд; U – прямое напряжение смещения ЭП (доли 1В); $D_{РБ}$ – коэффициент диффузии дырок в базе; S – площадь $p - n$ -перехода.

Динамическое (дифференциальное) сопротивление эмиттерного перехода обратно пропорционально эмиттерному току

$$r_{Э} = \frac{dU}{dI_{Э}} = \frac{kT}{q_e I_{Э}} \quad (3.3)$$

при $T = 300\text{K}$ $I_{\text{Э}} = 1\text{mA}$ равно $r_{\text{Э}} \approx 25\ \text{Ом}$.

Коллекторный ток содержит две составляющие. Одна из них является обычным током полупроводникового диода с несимметричным $p-n$ -переходом, при обратном включении напряжения и определяется формулой

$$I'_{\text{К}} = I_{\text{КО}} (e^{-\frac{q_e U}{kT}} - 1) \approx -I_{\text{КО}}, \quad (3.4)$$

где $I_{\text{КО}} = g_e D_{\text{PB}} S P'_{\text{БО}} L_{\text{PB}}^{-1}$ - тепловой дырочный ток коллектора, определяемый потоком $\Delta P'_{\text{БО}}$ через КП; $U \approx 10-20\ \text{В}$ и $q_e U \gg kT$. Характерное значение теплового тока при $T = 300\ \text{K}$ 2-5 мкА для германиевых и 0,01 – 0,1 мкА – для кремневых транзисторов. При повышении температуры на каждые 10°C тепловой ток практически удваивается. Поскольку его зависимость от температуры (термогенерация дырок $P'_{\text{БО}}$) очень сильная, то этот ток оказывает дестабилизирующее действие на работу транзистора. В формуле (3.4) ток $I'_{\text{К}}$ направлен в сторону базы, ток $I'_{\text{КО}}$ направлен из базы в коллектор. Вторая составляющая тока транзистора является током экстракции $I''_{\text{К}} \sim \Delta P_{\text{БК}}$, определяемым из условия (I): $I''_{\text{К}} \sim \alpha \Delta P_{\text{ЭБ}}$, так что

$$I''_{\text{К}} = \alpha I_{\text{Э}}, \quad (3.5)$$

где коэффициент переноса неосновных носителей через базу α обычно называют «коэффициентом передачи эмиттерного тока». Ток $I''_{\text{К}}$ направлен из базы в коллектор.

Результирующий коллекторный ток $I_{\text{К}} = I''_{\text{К}} - I'_{\text{К}} = I''_{\text{К}} + I_{\text{КО}}$, или

$$I_{\text{К}} = \alpha I_{\text{Э}} + I_{\text{КО}}. \quad (3.6)$$

В формуле (3.6) основной составляющей является ток $I''_{\text{К}} = \alpha I_{\text{Э}}$, поскольку $I_{\text{КО}} \ll I''_{\text{К}}$.

Динамическое сопротивление коллекторного перехода равно

$$r_{\text{К}} = \frac{dU'}{dI_{\text{К}}} = \gamma \frac{\sqrt{U'}}{I_{\text{Э}}}, \quad (3.7)$$

где $\gamma \approx 200\ \text{В}$ – коэффициент, зависящий от концентрации донорных атомов в базе, от ширины базы и от диффузионной длины L_{PB} . При $\gamma \approx 200\sqrt{\text{В}}$, $U' = 20\ \text{В}$ и $I_{\text{Э}} = 1\text{mA}$ получим $r_{\text{К}} \approx 10^6\ \text{Ом}$.

3.1.2 Схемы включения транзисторов

К внешним источникам напряжения транзисторов может подключаться в соответствии с одной из трех схем: с «общей базой» (рис.3.6), с «общим эмиттером» (рис.3.7) и с «общим коллектором» (рис.3.8). Часто при этом «общий» (для источников напряжения) вывод транзистора соединяется с корпусом приборов (заземляется). На рис.3.6 – 3.8 показаны значения прямого напряжения смещения U на ЭП и обратного напряжения смещения U' на КП, выраженные через напряжения источников питания. Мы рассмотрим два наиболее часто встречающихся на практике варианта схемы.

А. Схема с общей базой

Входным здесь является ток эмиттера $I_{\text{Э}}$, входным напряжением-напряжением $U_{\text{ЭБ}}$. Так как на ЭП $U = U_{\text{ЭБ}}$, то из выражения (3.2) уравнение «входных статических характеристик» транзистора соответствует обычным вольт - амперным характеристикам диода при прямом его включении.

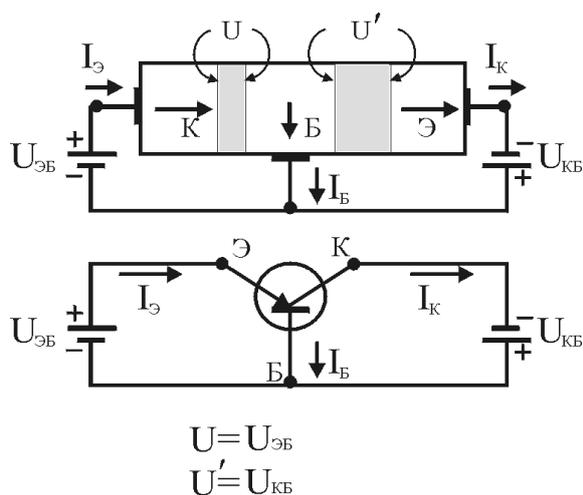


Рис.3.6

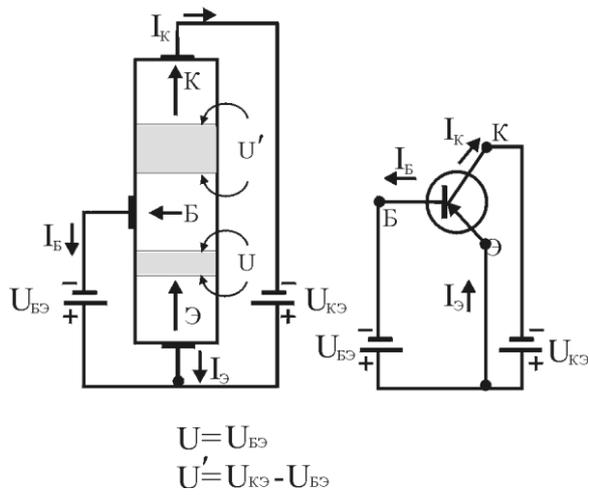


Рис.3. 7

Семейство входных характеристик, определяемых зависимостью, показано на рис.3.9. Оно очень слабо зависит от напряжения $U_{ЭБ}$, но существенно смещается влево с увеличением температуры вследствие возрастания $I_{Э0}$.

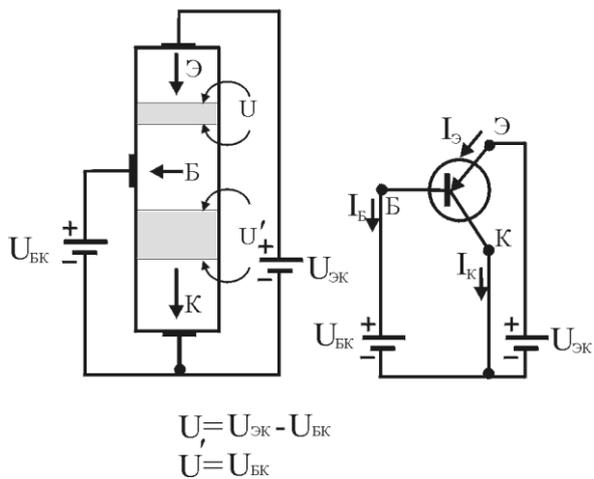


Рис. 3.8

$$I_{Э} = I_{Э0} \left(e^{-\frac{g_e U_{ЭБ}}{KT}} - 1 \right) = f(U_{ЭБ}) U_{КБ} = const \quad (3.8)$$

Входное динамическое сопротивление транзистора определяется по входным характеристикам как

$$R_{BX} = \frac{\delta U_{ЭБ}}{\delta I_{Э}} \Big|_{U_{КБ} = const} \quad (3.9)$$

Оно приблизительно равно сопротивлению $r_{Э}$.

В схеме с общей базой выходными являются ток I_K и напряжение $U_{КБ}$, причем на КП $U' = U_{КБ}$. Уравнением «выходных статических характеристик» является выражение (3.6), которое показывает, что ток I_K не зависит от напряжения $U_{КБ}$ и определяется лишь токами $I_{Э}$ и $I_{КО}$. Такие эквидистантные по приращению тока $I_{Э}$ «характеристики» должны быть параллельны оси напряжения $U_{КБ}$. Реальные выходные характеристики $I_K = f(U_{КБ})_{I_{Э} = const}$ отличаются от теоретических, прежде всего тем, что при положительном на коллекторе значении $U_{КБ} \approx 0$, коллектор перестает быть потенциальной ямой для дырок базы и режим экстракции нарушается. При отрицательной полярности (на коллекторе) напряжение $U_{КБ}$ вследствие отмеченной «модуляции» ширины базы, происходит некоторое увеличение коэффициента α и возрастание тока I_K с увеличением напряжения $U_{КБ}$.

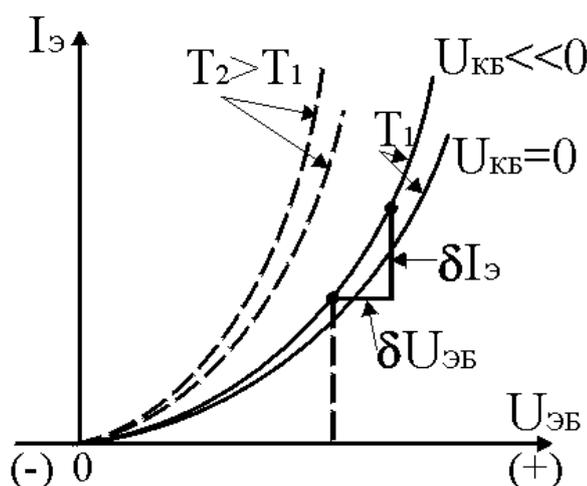


Рис. 3.9

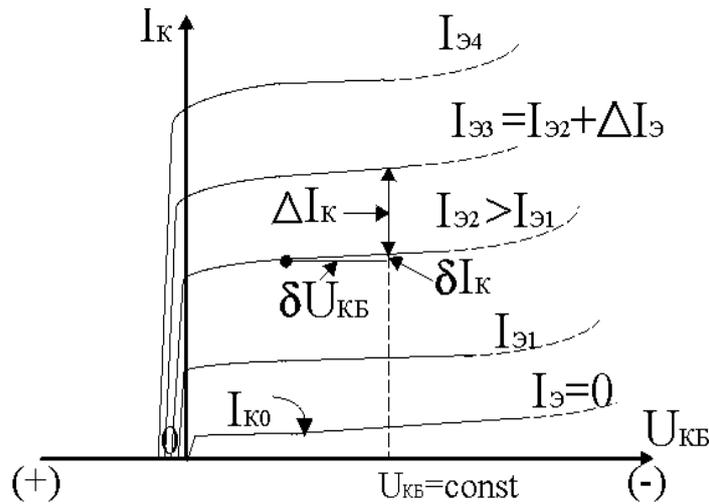


Рис.3. 10

Коллекторные вольт – амперные характеристики получают слабый наклон. Семейство выходных статических характеристик транзистора в схеме с общей базой показано на рис.3.10. С повышением температуры растет ток $I_{К0}$, и все семейство характеристик сдвигается вверх.

С помощью этих характеристик можно найти динамическое выходное сопротивление транзистора

$$R_{\text{ВЫХ}} = \left. \frac{\delta U_{\text{КБ}}}{\delta I_{\text{К}}} \right]_{I_{\text{Э}} = \text{const}}, \quad (3.11)$$

приблизительно равное сопротивлению $r_{\text{К}}$, а также динамический коэффициент передачи эмиттерного тока

$$\alpha_0 = \left. \frac{\Delta I_{\text{К}}}{\Delta I_{\text{Э}}} \right]_{U_{\text{КБ}} = \text{const}} \quad (3.12)$$

несколько отличающийся от $\alpha = I_{\text{К}}/I_{\text{Э}}$.

Поскольку $\alpha_0 < 1$, в схеме с общей базой нельзя получить усиления тока, т.е. $\Delta I_{\text{К}} < \Delta I_{\text{Э}}$. Транзистор здесь работает как усилитель напряжения или как усилитель мощности. Если напряжение $U_{\text{ЭБ}}$ на ЗП содержит переменную составляющую $\delta U_{\text{ЭБ}}(t)$, то переменную составляющую будет иметь и ток эмиттера; из выражения (3.9) следует $\delta I_{\text{Э}}(t) = \delta U_{\text{ЭБ}}(t) / R_{\text{ВХ}}$. Поэтому в соответствии с (3.12) переменная составляющая тока коллектора $\delta I_{\text{К}}(t) = \alpha_0 \delta I_{\text{Э}}(t) = \alpha_0 \delta U_{\text{ЭБ}}(t) / R_{\text{ВХ}}$. Для получения переменного напряжения $\delta U_{\text{Н}}(t)$ на выходе транзистора в его коллекторную цепь включают нагрузочное сопротивление $R_{\text{Н}}$, через которое протекает ток $\Delta I_{\text{К}}(t)$, так что

$$\delta U_N(t) = \delta I_K(t) R_H = \alpha_0 \frac{R_H}{R_{BX}} \delta U_{ЭБ}(t).$$

Коэффициент усиления по напряжению

$$K_U \approx \frac{\delta U_H(t)}{\delta U_{ЭБ}} = \alpha_0 \frac{R_H}{R_{BX}} \quad (3.13)$$

Нагрузочное сопротивление выбирают из условия $R_{BX} \ll R_H \ll R_{ВЫХ}$. Поэтому $K_U \approx \alpha_0 R_{ВЫХ} / R_{BX} \approx \alpha_0 r_K / r_{Э}$, где $r_K \gg r_{Э}$ и $K_U \gg 1$, так как $\alpha_0 \approx 1$. Следовательно, коэффициент усиления по напряжению в схеме транзистора с общей базой пропорционален отношению сопротивлений КП и ЭП.

Б. Схема с общим эмиттером

Входными величинами здесь являются ток базы I_B и напряжение $U_{БЭ}$. По закону Кирхгофа $I_B = I_{Э} - I_K$. Ток $I_{Э}$ определяется формулой (3.8), ток I_K – уравнением (3.6). Отсюда $I_B = I_{Э} - (\alpha I_{Э} + I_{КО}) = (1 - \alpha) I_{Э} - I_{КО}$, и «входные статические характеристики» транзистора в схеме с общим эмиттером

$$I_B = f(U_{БЭ})_{U_{КЭ} = \text{const}} \quad (3.14)$$

описываются уравнением

$$I_B = (1 - \alpha) I_{Э0} \left(e^{-\frac{q U_{БЭ}}{kT}} - 1 \right) - I_{КО} \quad (3.15)$$

и графически показаны на рис.3.11. Ток I_B практически в $(1 - \alpha)$ раз меньше тока $I_{Э}$. Эти характеристики смещены на $I_{КО}$ вниз по сравнению с обычными ВАХ диода. Они слабо зависят от напряжения $U_{КЭ}$ и существенно зависят от температуры вследствие изменения тока $I_{КО}$.

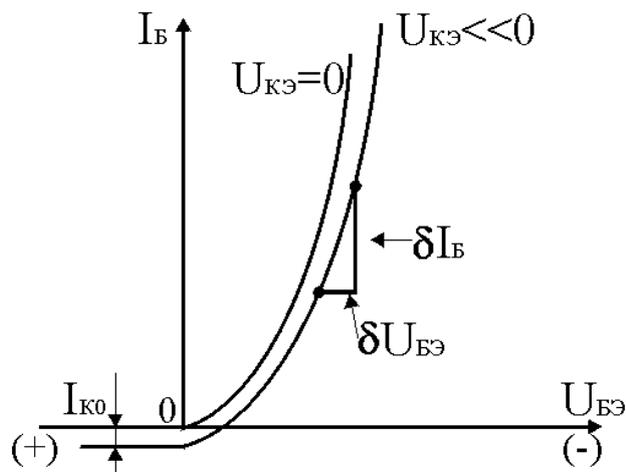


Рис.3.11

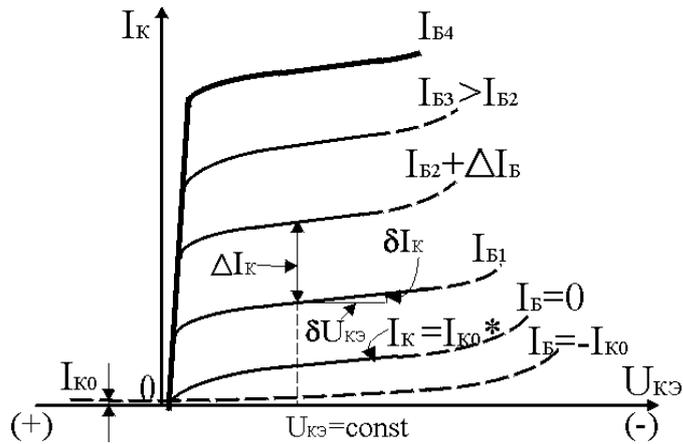


Рис.3. 12

Входное динамическое сопротивление транзистора можно определить по входным характеристикам

$$R_{ВХ} = \left. \frac{\delta U_{БЭ}}{\delta I_B} \right]_{U_{КЭ} = \text{const}}, \quad (3.16)$$

Оно примерно в $1/(1-\alpha)$ раз больше, чем в схеме с общей базой, т.е. транзистор при таком включении имеет высокоомный вход.

Выходные статические характеристики при таком включении

$$I_K = f(U_{БЭ}) \Big|_{I_B = \text{const}} \quad (3.17)$$

определяется из выражения (3.6) $I_K = \alpha I_{Э} + I_{К0} = \alpha(I_K + I_B) - I_{К0}$, откуда уравнение этих характеристик

$$I_K = \beta I_B + I_{К0}, \quad (3.18)$$

где $\beta = \frac{\alpha}{1-\alpha}$ - коэффициент передачи базового тока, или «коэффициент усиления по току»; $I_{К0} = \frac{I_{К0}}{1-\alpha} = (1-\beta)I_{К0}$. Здесь $I_{К0}$ - тепловой ток коллектора в схеме с общим эмиттером. Типичные значения $\beta = 20 - 100$ (при $\alpha = 0,95 - 0,99$). В некоторых современных транзисторах β бывает значительно больше. Семейство выходных статических характеристик транзистора в схеме с общим эмиттером показано на рис. 3.12. С их помощью можно найти динамическое выходное сопротивление транзистора

$$R_{ВЫХ} = \left. \frac{\delta U_{КЭ}}{\delta I_K} \right]_{I_B = \text{const}}, \quad (3.19)$$

которое приблизительно в β раз меньше, чем в схеме с общей базой, и динамический коэффициент усиления по току

$$\beta_O = \frac{\Delta I_K}{\Delta I_B} J_{U_{KЭ}} = const \quad (3.20)$$

поскольку $\beta_O \gg 1$, схемы с общим эмиттером используются для усиления тока ($\Delta I_K \gg \Delta I_B$) или для усиления напряжения. Для переменных составляющих токов коллектора и базы можно записать $\delta I_K(t) = \beta_O \delta I_B(t)$. Так как переменная составляющая входного напряжения $\delta U_{БЭ}(t) = \delta I_B(t) \cdot R_{ВХ}$, а переменное напряжение на нагрузочном сопротивлении R_H в цепи коллектора

$\delta U_H(t) = \delta I_K(t) \cdot R_H$, то коэффициент усиления по напряжению равен

$$K_U = \frac{\delta U_H(t)}{\delta U_{БЭ}(t)} = \beta_O \frac{R_H}{R_{ВХ}}. \quad (3.21)$$